

マイクロ波無線電力伝送用低入力レクテナに適したアンテナの研究

周 艶 篠原 真毅 三谷 友彦

京都大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

E-mail: yan_zhou@rish.kyoto-u.ac.jp, shino@rish.kyoto-u.ac.jp, mitani.tomohiko.3u @rish.kyoto-u.ac.jp

あらまし

レクテナの入力電力は小さいとき、RF-DC 変換効率は低下するという問題点がある。先行研究ではタンク回路と昇圧整流回路を用いてダイオード端の電圧を上げて RF-DC 変換効率を改善できた。本研究では、高インピーダンスレクテナと高 Q 値アンテナを持つレクテナを提案し、低入力レクテナの RF-DC 変換効率を改善することを目指す。まずは高インピーダンス整流回路を設計し、整流回路の線路のインピーダンスを上げることで RF-DC 変換効率を改善できることを証明した。次に、さらにダイオード端の電圧を上げるために、高インピーダンスパッチアンテナの設計を行った。また、Q 値が異なるパッチアンテナを整流回路に接続し、整流回路の整流効率の比較を行った。

キーワード RF-DC 変換効率、レクテナ、インピーダンス、高 Q 値

Study on Antennas Appropriate for Low-Power Rectennas in Microwave Power Transmission

Yan Zhou, Naoki Shinohara and Tomohiko Mitani

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto Univ., Gokasho, Uji City, Kyoto Prefecture, Japan. 611-0011

E-mail: yan_zhou@rish.kyoto-u.ac.jp, shino@rish.kyoto-u.ac.jp, mitani.tomohiko.3u @rish.kyoto-u.ac.jp

Abstract We proposed two methods to improve the RF-DC conversion efficiency of a low input rectenna; one was to improve the impedance of the rectenna and the other was to design the high Q value antenna. To begin with, we proved that the efficiency of the rectifying circuit can be improved by raising characteristic impedance. Then we designed the high impedance patch antennas and obtained that the characteristics of patch antennas were independent of impedance. Next, we measured efficiency of low-power rectifying circuit connected with a high Q value patch antenna. We obtained higher conversion efficiency with a low Q value antenna, but which had a small reflection loss.

Keyword RF-DC conversion efficiency, rectenna, impedance, high Q value

1.1. 研究背景・目的

現在、マイクロ波無線電力伝送(MPT)は注目を集めている。MPT 技術を用いて、RFID タグやユビキタス電源、あるいはバッテリーレスで駆動させる低電力機器に無線で電力を供給するとき、電池を搭載する必要がないので製品のコストを下げるができる。レクテナは MPT の重要な技術である。入力電力は小さいとき、レクテナの RF-DC 変換効率が悪くなる [1]。レクテナの効率を上げるために、先行研究では昇圧整流回路とタンク回路を並列共振させてダイオードに印加される電圧を上げる方法が提案されているが [2]、回路の複雑化という問題点があるため、製作のコストが高くなる。そこで、簡素化したレクテナを提案し、RF-DC 変換効率を上げることを目指す。

本研究では簡素化したレクテナに装荷するダイオードに印加される電圧を上昇させる手法として、高イン

ピーダンスレクテナと高 Q 値アンテナを持つレクテナを提案した。図 1 の左図より、高インピーダンスレクテナとは、高インピーダンスアンテナまたは高インピーダンス整流回路を用いてダイオード端の電圧を上昇させる手法である。図 1 の右図より、高 Q 値アンテナを持つレクテナとは、ダイオードを高 Q 値アンテナに装荷し、ダイオードに印加される電圧を上げる手法である。

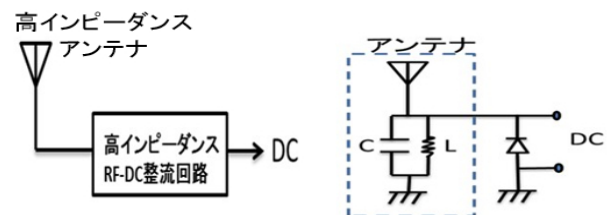


図 1. 高インピーダンスレクテナと高 Q 値アンテナを持つレクテナ

2. 高インピーダンスレクテナ

2.1. 高インピーダンス整流回路

ADS を用いて高インピーダンス整流回路の効率の検討を行った。昨年度の研究では、厚さ 1.6 mm、比誘電率 2.6 の基板パラメータを用いた整流回路における全ての線路の特性インピーダンスを上げることで 5% の整流効率を改善できた[3]。結果として、75 Ω から 125 Ω の範囲で整流効率が最大となった。125 Ω 以上の整流回路で効率を改善できなかった原因は、特性インピーダンスが上昇すると線路の損失を増えていくことであった。よって、本研究では整流回路の線路の損失を低下させるため、全ての線路の特性インピーダンスを上げる代わりに、ダイオードと直接接続する線路の特性インピーダンスのみを上げることを提案した。

今回の研究では、表 1 に示す AD1000 の基板パラメータを用いて整流回路の設計を行った。製作した 50 Ω、70 Ω、80 Ω、90 Ω、100 Ω の写真を図 2 に示す。図 2 に示すように、 $\lambda_g/4$ 線路と F 級負荷線路は 50 Ω で設計し、ダイオードとつながる整合線路を高インピーダンス化する。各インピーダンス線路の幅と長さを表 2 に表す。表 2 に示すように、100 Ω の場合、線路の幅が 0.1 mm となる。線路の幅が 0.1 mm より小さくなると実際の整流回路を作ることは難しくなる。そのため、整流回路の最大インピーダンスは 100 Ω とした。

表 1. 基板 AD1000 のパラメータ

厚さ (h)	0.8
比誘電率 (ϵ_r)	10.35
誘電正接 ($\tan \delta$)	0.0023

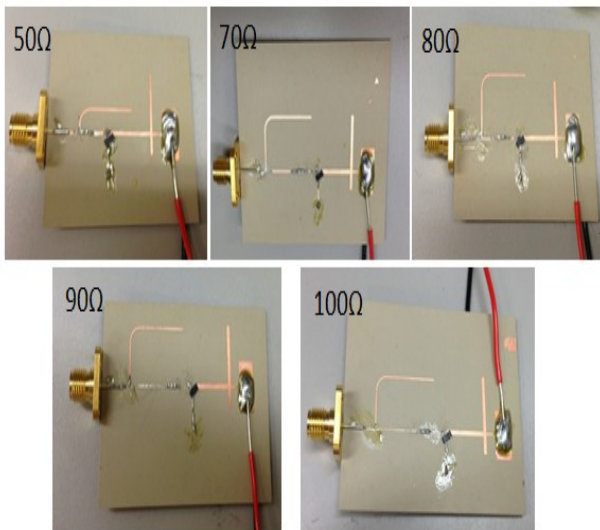


図 2 各インピーダンスの整流回路

表 2 各インピーダンスの整合線路の幅と長さ

インピーダンス [Ω]	整合線路の幅 [mm]	整合線路の長さ [mm]
50	0.72	13.00
70	0.41	25.02
80	0.28	17.92
90	0.19	25.84
100	0.12	26.53

また、図 3 に示す整合回路のスタブ回路の長さ l_2 と幅を調整することでコネクタとの整合を取る。各整流回路のスタブ回路の各パラメータを表 3 に示す。

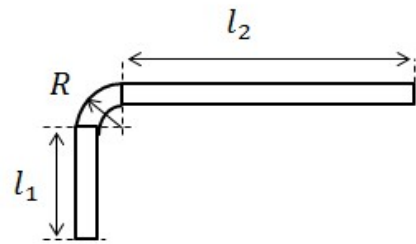


図 3 整流回路のスタブ回路

表 3 整流回路のスタブ回路各部のパラメータ

インピーダンス [Ω]	スタブの幅 [mm]	半径 (R) [mm]	長さ (l_1) [mm]	長さ (l_2) [mm]
50	0.5	3	1.20	12.28
70	0.5	3	8.38	14.71
80	0.5	3	9.98	12.47
90	0.5	3	7.93	14.99
100	0.5	3	7.55	14.99

図 4 に示す測定系を用いて各整流回路の整流効率の測定を行った。パワーセンサ 1 を用いて入力電力を測定し、パワーセンサ 2 を用いて反射波を測定する。整流効率 η の計算を次式に示す。

$$\eta = \frac{V_{\text{out}}^2 / R_L}{P_{\text{in}} - P_{\text{ref}}}$$

ここで、 V_{out} は出力電圧、 R_L は負荷抵抗、 P_{in} は入力電力、 P_{ref} は反射電力である。上式に示すように、整流効率は入射電力から反射電力を引いた値に対する負荷で消費された電力の割合である。

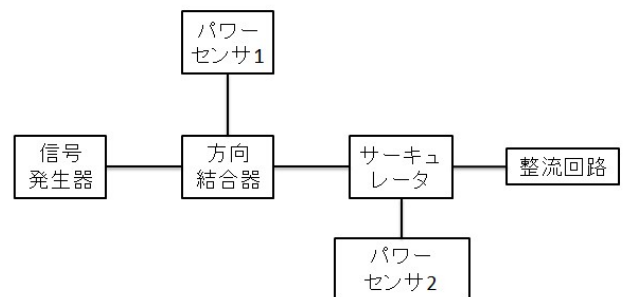


図 4 整流回路の測定系

①入力電力が 0.2 mW から 25 mW のときの整流効率を図 5 に示す。入力電力が 1 mW の場合、70 Ω、80 Ω の整流回路の整流効率は 50 Ω の整流回路より 3 ポイント程度上昇し、90 Ω、100 Ω の整流回路の整流効率は 50 Ω の整流回路より 8 ポイント程度低下した。②入力電力が 5 mW の場合、70 Ω、80 Ω の整流回路の整流効率は 50 Ω の整流回路よりそれぞれ約 6 ポイント、10 ポイント上昇し、90 Ω、100 Ω の整流回路の整流効率は 50 Ω の整流回路より 2 ポイント程度低下した。③入力電力が 10 mW の場合、70 Ω、80 Ω、90 Ω、100 Ω の整流回路の整流効率は 50 Ω の整流回路よりそれぞれ約 10 ポイント、13 ポイント、3 ポイント、2 ポイント上昇した。④入力電力が 20 mW の場合、70 Ω、80 Ω、90 Ω、100 Ω の整流回路の整流効率は 50 Ω の整流回路よりそれぞれ約 9 ポイント、12 ポイント、3 ポイント、2 ポイント上昇した。結果として、整合線路のインピーダンスが 80 Ω のときの整流回路の整流効率が一番高くなり、50 Ω の整流回路より 13 ポイント向上した。線路のインピーダンスを 80 Ω より高くしても整流効率は向上しなかった。そこで、本研究ではダイオードを直接高インピーダンスアンテナに接続し、ダイオード端の電圧をさらに上げることを目指す。

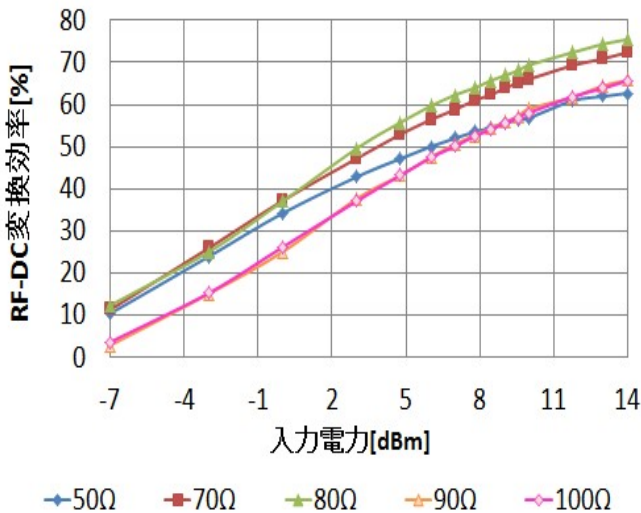


図 5 各インピーダンスの整流回路の効率の比較

2.2. 高インピーダンスアンテナ

表 4 に示す厚さ 0.4 mm の NPC-F260A 基板を用いて異なるインピーダンスのアンテナを作成し、送信電力が同じ場合の各アンテナの受信電力を測定した。50 Ω のアンテナの構造を図 6 に示し、100 Ω、150 Ω のアンテナの構造を図 7 に示す。100 Ω、150 Ω のアンテナを測定するために、アンテナと SMA コネクタの整合と取る必要がある。そのため、 $\lambda_g/4$ の整合線路を用いて SMA コネクタとの整合を取った。

表 4 基板 NPC-F260A のパラメータ

厚さ (h)	0.4
比誘電率 (ϵ_r)	2.55
誘電正接 ($\tan \delta$)	0.0015

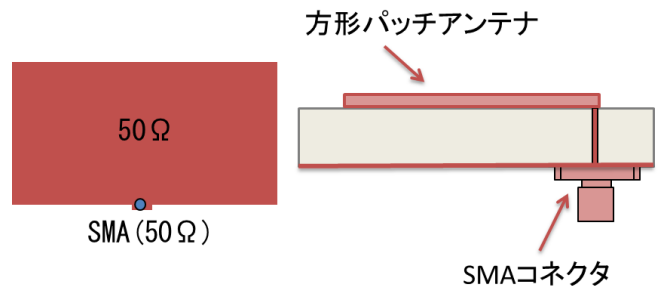


図 6 50 Ω の方形パッチアンテナの構造図

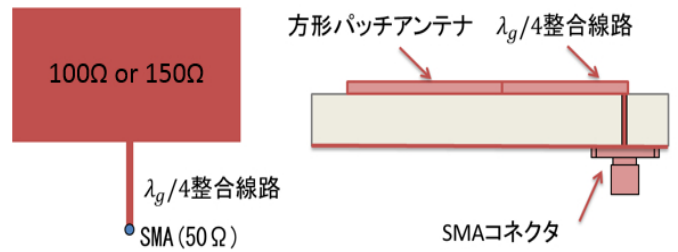


図 7 100 Ω と 150 Ω の方形パッチアンテナの構造図

アンテナの受信電力の測定風景の写真とブロック図を図 8 に示す。左の図は実際に測定した際の写真であり、送信アンテナと受信アンテナの距離は 26 cm である。右の図は測定系のブロック図である。パワーセンサは方向結合器に接続し、アンテナの受信電力を測る。測定機器の都合から今回の測定では反射電力測定は行えなかった。受信側においては送信電力を 40 mW、80 mW、160 mW...として順番に出力し、それぞれ送信電力において受信電力と整流回路の効率を同時に測定する。

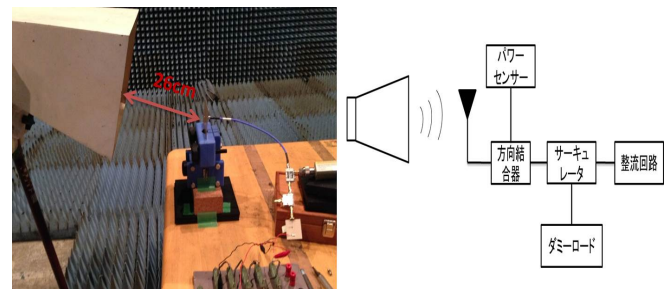


図 8 アンテナの受信電力を測定風景の写真とブロック図

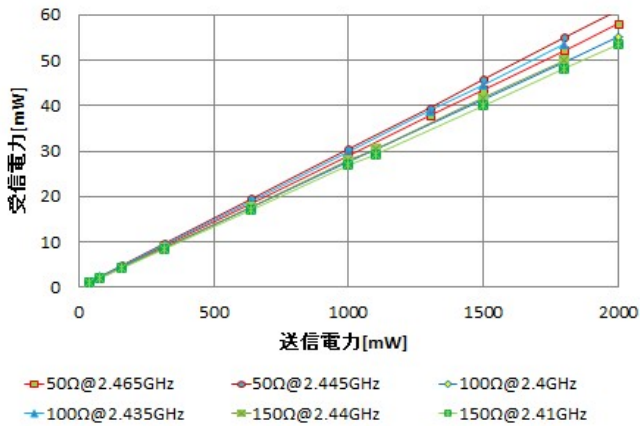


図9 特性インピーダンスが 50 Ω、100 Ω、150 Ω のアンテナの受信電力

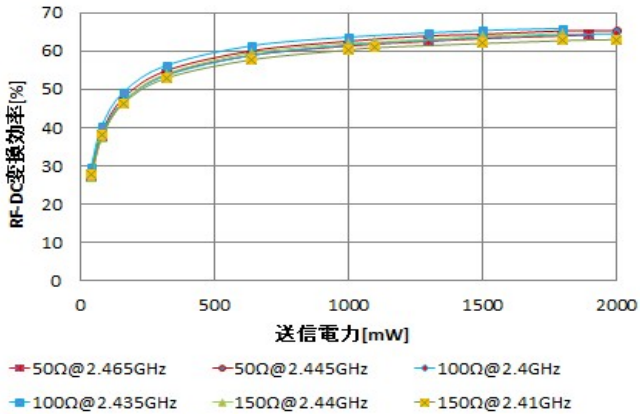


図10 50 Ω、100 Ω、150 Ω のアンテナに 同じ整流回路を接続したときの RF-DC 変換効率

共振周波数は 2.44GHz 付近、反射係数は同じ程度のアンテナを選択し、受信電力と同じ整流回路に接続したときの RF-DC 変換効率の比較を行った。特性インピーダンスが 50 Ω、100 Ω、150 Ω のアンテナの受信電力を図 9 に示す。図 9 より、出力電力が 1000 mW のときに 50 Ω のアンテナの受信電力は約 32 mW、100 Ω のアンテナの受信電力は約 30 mW、150 Ω のアンテナの受信電力は約 28 mW となった。

50 Ω、100 Ω、150 Ω のアンテナに同じ整流回路を接続したときの RF-DC 変換効率を図 10 に示す。今回用いた整流回路は 50 Ω のものであり、 $\lambda_g/4$ の整合線路を用いて整合を取ることで高インピーダンスと接続した。図 10 よりアンテナのインピーダンスを上げてても、整流回路の整流効率の差異は小さいことが分かる。ただし、50 Ω のアンテナの反射率は約 -20dB、100 Ω のアンテナの反射率は約 -18dB、100 Ω のアンテナの反射率は約 -8dB である。これらの結果から、アンテナのインピーダンスを上げててもアンテナの特性に対して大きな影響が見られないことが分かった。

従って、今後はダイオードを高インピーダンスアンテナに装荷し、より高い RF-DC 変換効率を得ることを目指す。ダイオードが装荷されるアンテナと出力フィルタの整合を取ることは今後の課題とする。

3. 高 Q 値アンテナを持つレクテナ

本研究では、3 種類のパッチアンテナと一つの整流回路を同軸ケーブルで接続し、RF-DC 変換効率の比較を行った。測定を行ったパッチアンテナ 1, 2, 3 の写真を図 11 に示す。これらのアンテナに用いた基板のパラメータを表 5 に示す。表 5 に示すように、アンテナ 1 は比誘電率 10.35、厚さ 0.8 mm の基板を用いて裏から給電する。アンテナ 2, 3 は比誘電率 2.55、厚さ 0.4 mm の基板を用いて線路から給電する。また、アンテナ 2 とアンテナ 3 のパッチのサイズは同じであるが、アンテナ 3 の基板のサイズはアンテナ 2 の基板のサイズより大きくした。ネットワークアナライザで測定した 3 種類のアンテナの反射率 $|S_{11}|$ を図 12 に示す。2.48 GHz のときにアンテナ 1, 2, 3 の $|S_{11}|$ はそれぞれ -12 dB, -18 dB, -23 dB になった。半値幅法でアンテナの無負荷 Q 値 Q_u の計算を行った[4]。アンテナ 1, 2, 3 の Q_u はそれぞれ 30, 23.1, 18.44 になった。

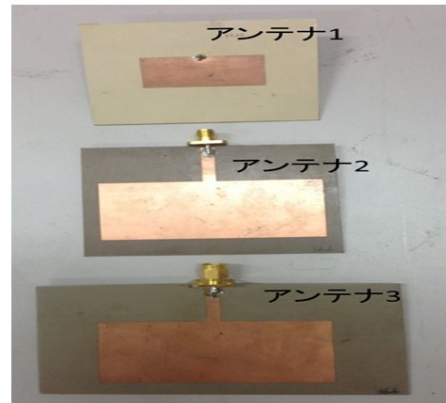


図11 測定を行ったパッチアンテナ 1, 2, 3 の写真

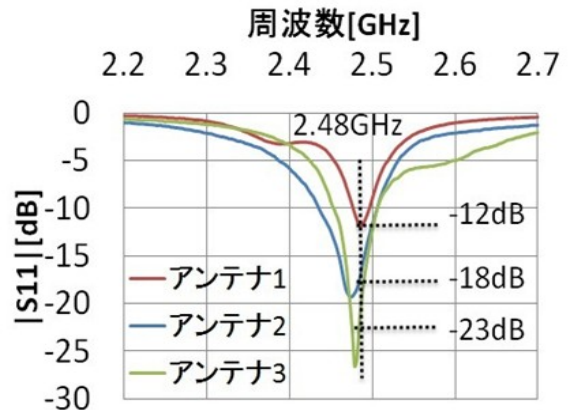


図12 ネットワークアナライザで測定した 3 種類のアンテナの反射率 $|S_{11}|$

表 5 アンテナ 1, 2, 3 に用いた基板のパラメータ

受信 アンテナ	基板 比誘電率	基板厚さ [mm]	給電部
アンテナ 1	10.35	0.8	裏から給電
アンテナ 2	2.6	1.6	線路から給電
アンテナ 3	2.6	1.6	線路から給電

アンテナ 1, 2, 3 と同じ整流回路を接続し、RF-DC 変換効率の測定を行った。測定系を図 13 に示す。この発振器から増幅器と繋がって 2.48 GHz の信号を出力し、パワーセンサ a をパワーメータに繋げて、送電電力を測る。一方で、パワーセンサ b をパワーメータに繋げ、受信側の受電電力を測定する。また、RF-DC 整流効率はパワーセンサを整流回路に置き換えることで測定する。測定した手順について述べる。図 13(a)のように、アンテナにパワーセンサを接続したときに、パワーセンサが受け取る電力と送信側の送信電力を記録する。図 13(b)のように、アンテナと整流回路を接続したときに、記録した送信電力を送信アンテナから出力し、整流効率を測定する。

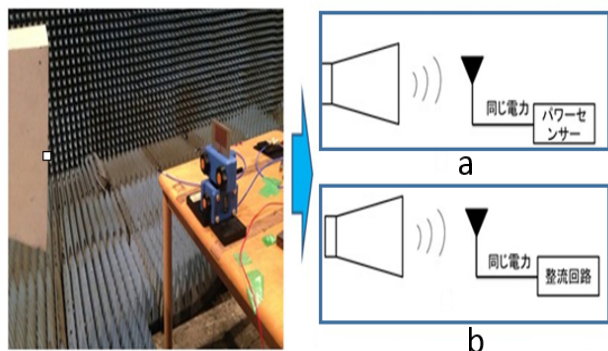


図 13 アンテナ 1, 2, 3 と同じ整流回路を接続し、RF-DC 変換効率を測定する測定系

測定の結果を表 6 に表す。整流回路に同じ電力を入力したときアンテナが異なると、RF-DC 変換効率が異なる。入力電力が 0.5 mW, 1 mW の場合、アンテナ 3 の効率はアンテナ 2 より 5% 程度大きく、アンテナ 2 の効率はアンテナ 1 より 5% 大きい。受信電力が増加するにつれアンテナ 1, 2, 3 の RF-DC 変換効率の差異が減少している。また、表 6 に示すように、レクテナとして測定した場合と整流回路単体を比較すると、入力電力が 0.5 mW, 1 mW の場合、後者のほうが整流効率高く、入力電力が 10 mW 以上の場合前者のほうが整流効率高いと分かる。

この結果より、アンテナ 3 と整流回路を接続したとき

に一番 RF-DC 変換効率が高くなったことが分かる。アンテナ 3 の Q 値が一番低くなったが、反射率は最も小さかった。従って、反射率が小さい方が RF-DC 変換効率が良くなることが分かった。

表 6 アンテナ 1, 2, 3 と同じ整流回路を接続した RF-DC 変換効率

受信電力 [mW]	アンテナ 1 効率[%]	アンテナ 2 効率[%]	アンテナ 3 効率[%]	整流回路 のみ効率[%]
0.5	12.99	17.16	17.96	19.60
1	25.09	29.04	30.01	29.77
2	36.86	40.00	40.80	38.61
4	47.12	48.83	50.24	46.81
10	57.57	58.32	59.45	54.92
20	62.33	62.49	63.84	59.29
30	64.81	64.75	65.41	61.31

4. 結論

50 Ω の整流回路と整合線路のインピーダンスが 70 Ω、80 Ω、90 Ω、100 Ω の整流回路に対して、反射波を除いた整流効率を比較した。その結果、整合線路のインピーダンスが 80 Ω のときの整流回路の効率が一番高くなり、50 Ω の整流回路より 13 ポイント向上した。異なるインピーダンスのアンテナの受信電力を測定し、アンテナの特性を比較した。アンテナのインピーダンスを上げてもアンテナに大きい影響が見られなかった。また、高 Q 値を持つレクテナの RF-DC 変換効率について検討を行った。Q 値が低く反射係数が小さいアンテナのほうが、RF-DC 変換効率が高くなった。

文 献

- [1] 篠原 真毅, “マイクロ波を用いた無線電力伝送の基礎 - アンテナ技術を中心に -”, 次世代アンテナ・伝搬技術ワークショップ(主催 Kansai Chapter, 2010.pp.113-135.
- [2] Kitayoshi, Hitoshi, and K. Sawaya. “Passive Temperature Sensing Tag for Sensor Networks.” Antennas, Propagation & EM Theory, 2006. ISAPE'06. 7th International Symposium on. IEEE, 2006.
- [3] 周 艶, 篠原 真毅, 三谷 友彦, “高効率 RF-ID 用マイクロ波受電素子の開発”, 第 16 回無線電力伝送時限研究専門委員会研究会, WPT2012-55, 京都, Mar. 15-16, 2013.
- [4] “Q の意味と抽出法”, 電磁界解析ソフトウェア http://www.sonnetsoftware.co.jp/support/tips/how2meas_Q/